

Ireneusz PIELECHA
Jakub CZAJKA
Przemysław BOROWSKI
Krzysztof WISŁOCKI

PTNSS–2013–SC–084

Thermodynamic indexes of Atkinson cycle combustion engine operation under transient conditions

Abstract: The paper discusses the results of indicator research of transient states of an engine operating in the Atkinson cycle. Such states are the most frequently observable ones during engine operation and are a subject of many research and development works. The investigations were carried out using a fast varying data acquisition system using engine speed sensor and the pressure sensors fitted in the spark plug. The analysis was performed under the conditions of engine start and its changing speeds at different loads. The basic thermodynamic indexes of the process under transient states were determined and compared with the indexes obtained under steady states.

Keywords: *combustion engine, transient engine conditions, start-stop system*

Termodynamiczne wskaźniki pracy silnika spalinowego z obiegiem Atkinsona w warunkach niestabilnych

Streszczenie: W artykule omówiono wyniki badań indykatorowych niestabilnych warunków pracy silnika spalinowego pracującego z wykorzystaniem obiegu Atkinsona. Warunki takie w znacznym stopniu odpowiadają za pracę jednostki napędowej i stanowią obecnie jeden z głównych kierunków prac badawczych. Badania wykonano wykorzystując układ do akwizycji sygnałów szybkozmiennych z wykorzystaniem czujników prędkości obrotowej wału korbowego oraz czujnika ciśnienia zamontowanego w świecy zapłonowej. Analizę wykonano w warunkach rozruchu silnika, a także podczas zmiany prędkości obrotowych przy zróżnicowanych obciążeniach. Określono podstawowe termodynamiczne wskaźniki procesu w warunkach niestabilnych i zestawiono je ze wskaźnikami wynikającymi z warunków ustalonych.

Słowa kluczowe: *silnik spalinowy, stany niestabilne pracy silnika, system start-stop*

1. Wprowadzenie

Badanie parametrów i określenie wskaźników operacyjnych pracy silnika spalinowego wykonuje się głównie w stanach ustalonych jego pracy. Znajomość zachowania silnika w stanach przejściowych (niestabilnych) pozwala na ocenę zmian procesu spalania z cyklu na cykl. Proces ten jest identyfikowany przede wszystkim przez rozwój ciśnienia spalania w silniku. Jego zmiana determinuje wywiązywanie ciepła, które świadczy o sprawności silnika spalinowego. Istotna jest również znajomość procesów niestacjonarnych podczas wyłączania cylindrów w czasie pracy, a także zastosowanie systemu start-stop. Znajomość procesów spalania w stanach przejściowych, które nie są dokładnie zinterpretowane, zwiększa możliwości sterowania silnikiem w takich warunkach jego pracy.

Poniżej opisane prace badawcze koncentrują się wokół zagadnień niestabilnych warunków pracy silnika o zapłonie iskrowym z cyklem Atkinsona. Cykl ten charakteryzowany jest późnym zamknięciem zaworu dolotowego w porównaniu do obiegu silnika Otto. Obieg taki powoduje zmniejszenie strat napełniania i jednocześnie cechuje

się większą sprawnością cieplną. Zmienne fazy rozrządu stosowane w silnikach z cyklem Atkinsona powodują, że zamknięcie zaworu dolotowego można zmieniać w dość szerokim zakresie. Wynika z tego, że rzeczywista pojemność cylindra podczas suwu sprężania jest znacznie mniejsza niż podczas suwu pracy i rozprężania, co sprzyja skuteczniejszemu wykorzystaniu energii paliwa.

Obecne badania dotyczące zmiennych warunków pracy silników spalinowych koncentrują się na kilku obszarach:

a) analizie cykl-po-cykle (*cycle-by-cycle*) – czyli analizie przebiegów ciśnienia w cylindrze, wywiązania ciepła oraz temperatury, w kolejnych, następujących po sobie cyklach podczas pracy silnika. Badana jest powtarzalność charakterystycznych wielkości procesu, m.in. maksymalnego ciśnienia spalania oraz średniego ciśnienia indykowanego p_i . W badaniach typu *cycle-by-cycle* analizowane są zmiany różnych wskaźników w kolejnych cyklach w różnych warunkach pracy silnika. Są to np. badania wpływu zmiany stopnia sprężania i doładowania [3], w których poddano analizie rozrzut wyników wskaźników operacyjnych cykl-po-cykle w postaci optymalnego czasu początku wtrysku oraz zapłonu

paliwa dla dwóch różnych stopni sprężania podczas wtrysku metanolu. Badania te wykazały, że współczynnik zmienności średniego ciśnienia indykowanego $CoV(p_i)$ (CoV – *coefficient of variation*) dla mniejszego stopnia sprężania i małych obciążeń jest mniejszy niż dla większego stopnia sprężania. Badania z cyklu na cykl prowadzono także z wykorzystaniem paliw gazowych [8]. Dokonano badań rozchodzenia się płomienia kolejnych 100 cykli pracy silnika. Wykazano, m.in. zależność rozrzutów wartości głównego czasu spalania z całkowitym czasem spalania dla różnych stopni sprężania przy różnych prędkościach obrotowych. Jak wynika z badań *cycle-by-cycle* przedstawionych w [4, 7] dodatkowe układy, np. system recyrkulacji spalin EGR, także mają wpływ na wskaźniki pracy silnika w kolejnych cyklach. Badania opisane w [4] wykazały mniejszą powtarzalność kolejnych cykli pracy silnika przy zastosowaniu EGR, natomiast wyniki badań [7] przedstawiają pogorszenie parametrów jego pracy w zmiennych warunkach z powodu opóźnienia reakcji silnika wywołanej obecnością układu EGR;

b) warunkach pracy silnika z układem start-stop – trybem dotyczącym rozruchu i wyłączenia silnika. W badaniach przedstawionych w [5] analizowano przebiegi ciśnień szybkozmiennych zależnych od początku wtrysku oraz wyprzedzenia zapłonu. Zmianie ulegały także fazy rozrządu (otwarcia zaworów dolotowych). Wykazano w nich m.in. większy przyrost ciśnienia przy mniejszych prędkościach rozruchu. Analiza wskaźników termodynamicznych wykazała największy przyrost wywiązywania ciepła w początkowej fazie rozruchu. W badaniach typu start-stop uwzględnia się także zmianę temperatury cieczy chłodzącej silnika oraz jej wpływ na emisję związków toksycznych. Wyniki badań [2] wskazują na zwiększoną emisję węglowodorów HC podczas zimnego rozruchu. Wykazano także częste wypadanie pierwszych zapłonów podczas początkowych cykli pracy silnika;

c) zmiennych prędkościach obrotowych – zmienne warunki w trakcie jazdy, takie jak przyspieszanie, hamowanie lub zmiana nachylenia drogi. W badaniach przedstawionych w [1] wykazano zwiększenie emisji NO_x podczas zmniejszania prędkości obrotowej silnika. Podobne efekty zaobserwowano w badaniach przedstawionych w [6], w których badano także zależność emisji tlenków azotu NO_x od ciśnienia spalania. Wykazano, że zwiększenie obciążenia skutkujące zmianą prędkości obrotowej powoduje wzrost ciśnienia w cylindrze i jednocześnie zwiększoną emisję NO_x .

Z wstępu wynika, że zagadnienia dotyczące nieustalonych warunków pracy silnika nie są dokładnie poznane. Tak więc celem niniejszych badań jest dokonanie przydatności stanów

przejściowych silnika spalinowego do oceny jego pracy. Spodziewanym efektem prac jest wyznaczenie takich wskaźników operacyjnych procesów, które pozwolą scharakteryzować nieustalone warunki pracy silnika spalinowego.

2. Metodyka badań

Badania procesu spalania prowadzono na silniku spalinowym stanowiącym element hybrydowego układu napędowego Toyoty Prius (rys. 1), którego dane techniczne przedstawiono w tablicy 1.



Rys. 1. Widok stanowiska badawczego

Tablica 1. Dane techniczne silnika pracującego w cyklu Atkinsona

Wielkość	Jednostka	Wartość
Typ silnika	-	1NZ-FXE
Liczba cyl./układ	-	4/rzędowy
Objętość	cm ³	1497
S x D	mm x mm	75,0 x 84,7
ε	-	13
Ne	kW @ obr/min	53 @ 4500
Mo	Nm @ obr/min	115 @ 1200
Rozrząd	otw. dolotu	18° ÷ -25° przed GMP
	zamk. dolotu	72° ÷ 115° po DMP
	otw. wylotu	34° przez DMP
	zamk. wylotu	2° po GMP

Uzyskanie wiedzy o chwilowych stanach pracy silnika spalinowego wymagało podjęcia badań w zakresie analizy sygnałów szybkozmiennych. Konieczna jest więc ocena chwilowych wartości parametrów pracy silnika spalinowego w odniesieniu do poszczególnych cykli spalania (tzw. analiza z cyklu-na-cykl).

Aparaturę pomiarową stanowił system do akwizycji procesów szybkozmiennych AVL IndiMicro pozwalający na pomiary następujących wielkości:

- ciśnienia w cylindrze – wykorzystano czujnik zintegrowany ze świecą zapłonową AVL GH13Z31 (zakres pomiarowy 0-25 MPa, czułość 15,83 pC/bar).
- obrotu wału korbowego – realizowano przy wykorzystaniu sygnału z indukcyjnego czujnika prędkości obrotowej wału korbowego ($\Delta\alpha = 1^\circ\text{OWK}$).

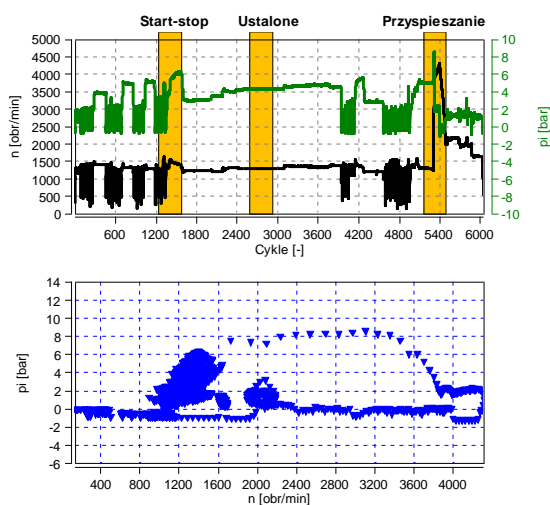
Analizy wyników dokonano z wykorzystaniem oprogramowania Concerto firmy AVL.

Dysponując mobilnym stanowiskiem napędu hybrydowego (rys. 1) wykonano badania (rys. 2):

a) ustalonych warunków pracy silnika pozwalająca na ocenę równomierności pracy silnika spalinowego na podstawie współczynnika zmienności CoV przebiegów ciśnienia maksymalnego, średniego ciśnienia indykowanego oraz innych wielkości termodynamicznych,

b) pracy silnika podczas wykorzystania systemu start-stop, przy czym silnika spalinowego nie uruchamia rozrusznik tylko silnik elektryczny,

c) zmiennych warunków pracy silnika, w aspekcie zmiany prędkości obrotowej i obciążenia.

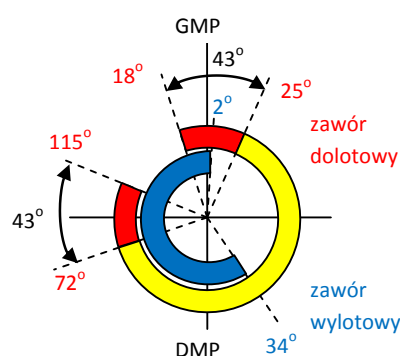


Rys. 2. Przebieg zmienności pracy silnika (na górze) oraz średnie wartości ciśnienia indykowanego (na dole) uzyskane podczas badań

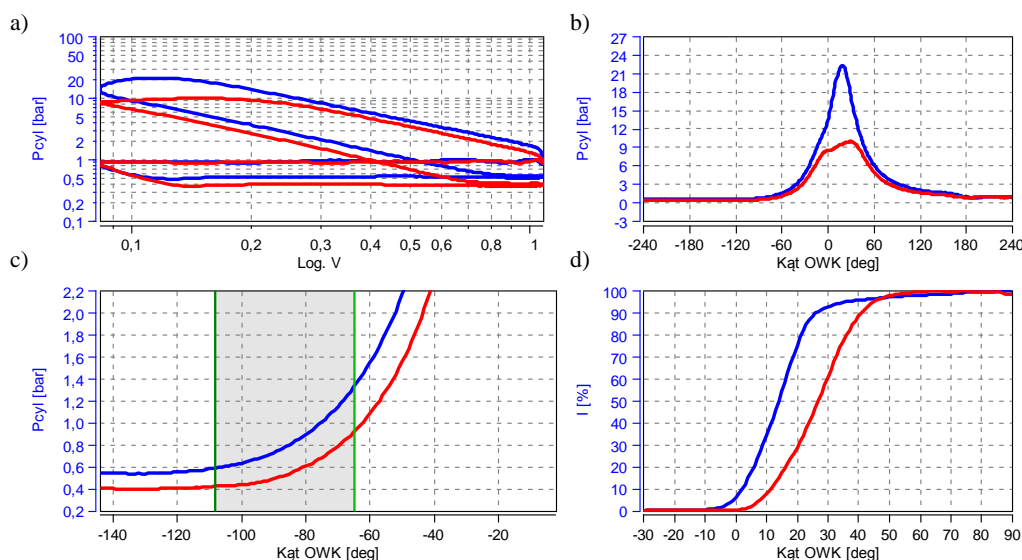
Badania prowadzono wykorzystując z przebiegu przedstawionego na rys. 2 fazę rozruchu (29 cykli), fazę ustalonych warunków pracy silnika (350 cykli) oraz fazę przyspieszania (41 cykli).

3. Charakterystyka pracy obiegu Atkinsona

Jak wspomniano wcześniej, obieg Atkinsona cechuje późne zamknięcie zaworu dolotowego. W przypadku badanego silnika spalinowego, wykorzystując zmienne fazy rozrządu (rys. 3), możliwe jest uzyskanie zmian otwarcia zaworu dolotowego w granicach 72–115 °OWK po DMP. W skrajnym przypadku (115°) oznacza to bardzo późne zamknięcie zaworu dolotowego. Zmiany faz rozrządu prowadzą do określonych zmian parametrów termodynamicznych obiegu silnika (rys. 4).



Rys. 3. Fazy rozrządu badanego silnika spalinowego

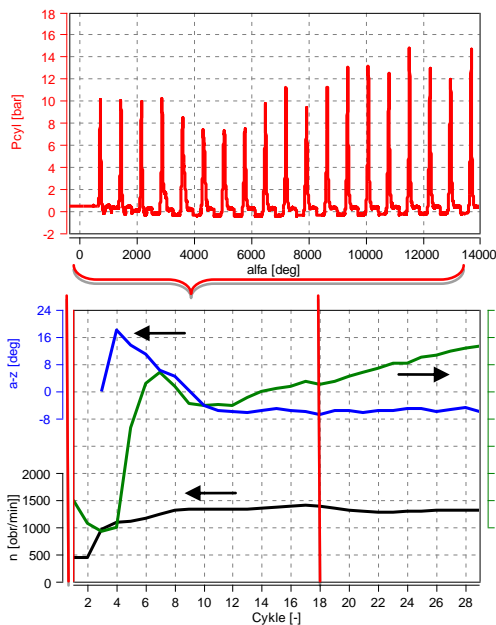


Rys. 4. Przykładowe przebiegi P_{cyl} przy zmiennym zamknięciu zaworu dolotowego: a) zamknięty wykres indykacyjny, b) przebieg ciśnienia w cylindrze, c) zmiana ciśnienia w cylindrze w przedziale zamknięcia zaworu dolotowego, d) przebieg wywiązywania ciepła w silniku

Późniejsze zamknięcie zaworu dolotowego powoduje uzyskanie mniejszej pętli dodatniej obiegu silnika (rys. 4a) w wyniku zmniejszonej wartości ciśnienia sprężania powietrza (rys. 4c). Skutkuje to mniejszymi wartościami maksymalnego ciśnienia sprężania (rys. 4b) oraz zmniejszoną wartością wywiązywania ciepła (rys. 4d).

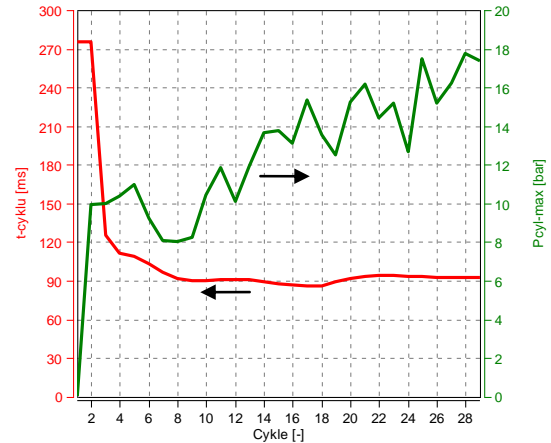
4. Analiza układu start-stop

Analizę prowadzono podczas wykorzystania hybrydowego napędu Toyoty Prius. W układzie tym, rozruchu silnika spalinowego dokonuje się przy użyciu silnika elektrycznego (a nie rozrusznika). Z tego powodu prędkości obrotowe poszczególnych cykli uruchamiania silnika spalinowego są istotnie większe niż przy wykorzystaniu rozrusznika (rys. 5). Pierwszy cykl pracy silnika realizowany jest przy $n = 1000$ obr/min.



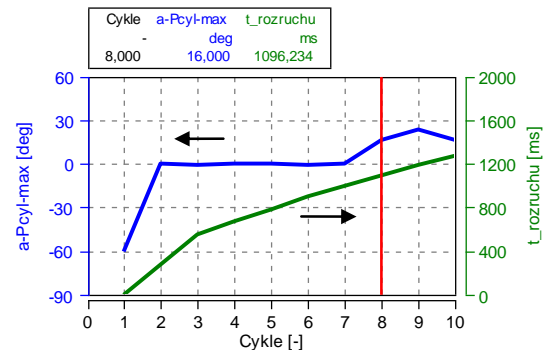
Rys. 5. Wyodrębnione przebiegi ciśnienia spalania (na górze) oraz wskaźniki pracy: prędkość obrotowa, kąt wyprzedzenia zapłonu oraz średnie ciśnienie indykowane (na dole) dotyczące rozruchu silnika

Tak duża prędkość obrotowa rozruchu silnika powoduje, że następuje szybka stabilizacja czasu trwania cyklu pracy silnika spalinowego. Z rys. 6 wynika, że stabilizacja ta następuje po 7 cyklach. W trzecim cyklu, gdy prędkość obrotowa uzyskuje wartość ponad 1000 obr/min, sterownik zadaje wartość wyprzedzenia zapłonu. Należy podkreślić, że badany silnik spalinowy nie pracuje na biegu jałowym (napęd hybrydowy) i z tego powodu minimalna prędkość obrotowa silnika jest większa niż prędkość typowego biegu jałowego.

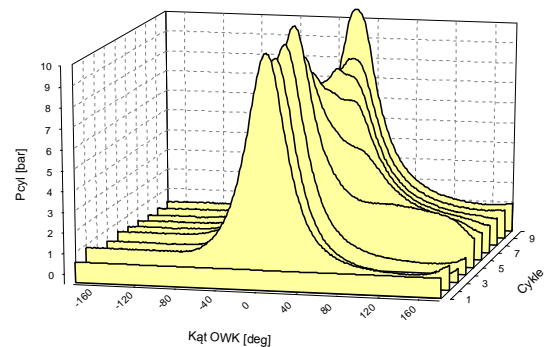


Rys. 6. Czasy poszczególnych cykli pracy silnika oraz maksymalne ciśnienia spalania podczas uruchamiania silnika spalinowego

Analiza wartości kąta, przy którym następuje maksimum ciśnienia w cylindrze (rys. 7) wskazuje, że stabilna praca silnika rozpoczyna się dopiero w 7-8 cyklu obrotu wału, gdy kąt wystąpienia maksymalnego ciśnienia spalania znajduje się po GMP. Jednak analiza wykresu indykatorowego wskazuje, że proces spalania występuje już w 5 cyklu obrotu wału korbowego, gdyż spalanie rozpoczyna się ze znacznym opóźnieniem w stosunku do GMP (rys. 8), uzyskując w okolicach 40° po GMP wyraźny przyrost ciśnienia).

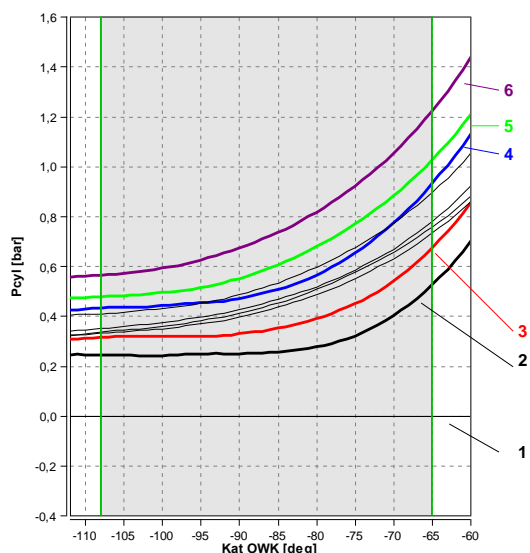


Rys. 7. Zmiany kątów maksymalnego ciśnienia w cylindrze ($a-P_{cyl-max}$) w kolejnych cyklach pracy silnika po rozruchu



Rys. 8. Przebieg kolejnych cykli podczas rozruchu silnika

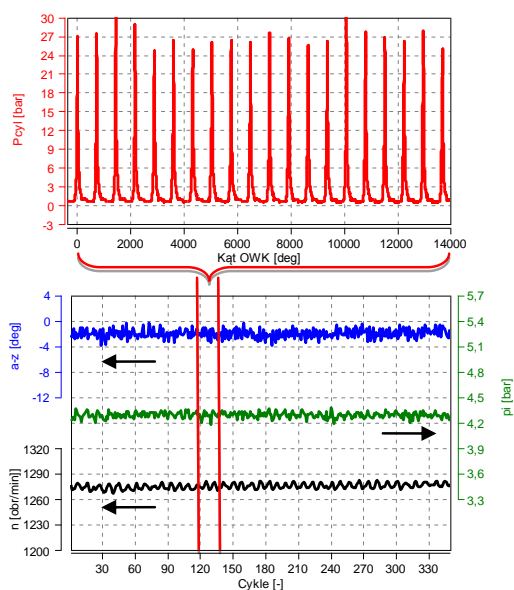
Wpływ pracy silnika z obiegiem Atkinsona na ciśnienie dolotu jest znaczący podczas rozruchu. Znaczne opóźnienie zamknięcia dolotu obserwuje się podczas pierwszych cykli pracy. Analiza ciśnienia w cylindrze w zakresie możliwych zmian zamknięcia dolotu wskazuje na jego wcześniejsze zamknięcie (rys. 9).



Rys. 9. Zmiany ciśnienia w cylindrze wynikające ze zmian faz rozrządu silnika (cyfry oznaczają kolejne cykle pracy silnika; 2 – późne zamknięcie zaworu dolotowego, 6 – wczesne zamknięcie zaworu dolotowego)

5. Analiza ustalonych warunków pracy

Analiza ustalonych warunków pracy silnika obejmowała 350 cykli pracy silnika (rys. 10). Na ich podstawie stwierdzono dużą równomierność pracy silnika, co zaprezentowano w tabelicy 2.



Rys. 10. Przebieg ustalonych warunków pracy silnika

Tablica 2. Analiza statystyczna ustalonych warunków pracy silnika

	p_i bar	$P_{cyl-max}$ bar	n rpm	t -cyklu ms
Min	4.18	21.81	1266.5	93.57
Mean	4.29	27.15	1274.9	94.13
Max	4.37	31.14	1282.4	94.75
Std	0.034	1.36	3.15	0.233
Min%	97.42	80.34	99.34	99.41
Max%	101.9	114.7	100.6	100.7
CoV%	0.798	5.00	0.247	0.247

Analiza wielkości podstawowych wskazuje na istnienie dużej równomierności pracy silnika. Potwierdza to mała wartości współczynnika zmienności średniego ciśnienia indykowanego wynosząca 0,798 dla 350 cykli pracy silnika. Jednakże analiza tego wskaźnika dla ciśnienia maksymalnego

wskazuje na istnienie pewnych rozbieżności $CoV(P_{cyl-max}) = 5,0$. Analiza rozrzutów wartości $P_{cyl-max}$ wskazuje na rozrzuty o wielkości 1 MPa. Wynika z tego, że wielkość ta powinna być kontrolowana razem z wartościami $CoV(p_i)$. Na niewielkie rozrzuty wskazują również zmiany prędkości obrotowej i czasu trwania cyklu (powiązane ze sobą). Można zauważyć, że wartości bezwzględne prędkości obrotowej i czasu cyklu (t -cyklu) wpływają na odchylenie standardowe, lecz nie wpływają na uzyskanie odmiennych wartości CoV . Z tego powodu określanie równomierności pracy silnika na podstawie odchylenia standardowego nie może być miarodajne i właściwe.

Badania dotyczące zmienności parametrów termodynamicznych wskazują na duże odchylenia kąta rozpoczęcia spalania (tab. 3). Cechą charakterystyczną jest zmniejszanie wielkości CoV w miarę rozwoju spalania (wielkości AI_{10} , AI_{50} oraz AI_{90} definiują 10%, 50% oraz 90% wywiązanego ciepła). Oznacza to, że mimo zróżnicowanego rozpoczęcia spalania jego przebieg jest ustabilizowany. Zmiany początku spalania wynikają z konieczności utrzymania prędkości obrotowej, którą uzyskuje się przez zmianę kąta wyprzedzenia zapłonu (rys. 10).

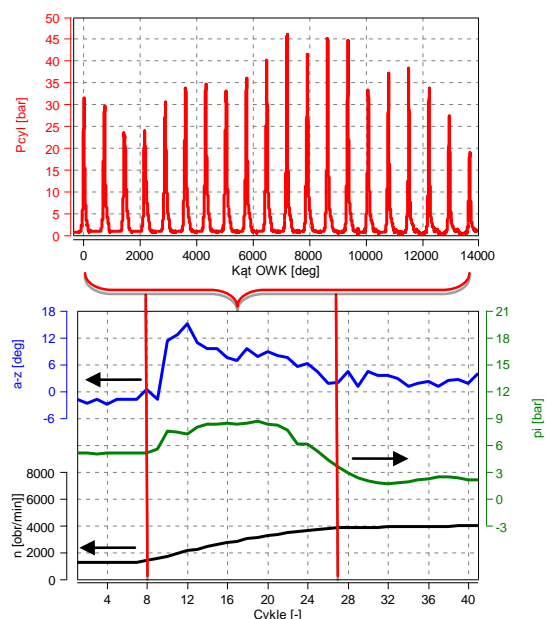
Tab. 3. Uśrednione wskaźniki spalania podczas ustalonych warunków pracy silnika

	SOC deg	AI_{10} deg	AI_{50} deg	AI_{90} deg
Min	-3.10	-0.600	7.55	15.30
Mean	-1.38	1.22	11.15	19.85
Max	0.650	3.40	16.45	26.75
Std	0.659	0.699	1.24	1.70
CoV%	-47.94	57.29	11.11	8.55

Znacznie bardziej istotne z punktu widzenia pracy silnika i jej analizy są warunki niustalone, które przedstawiono w rozdziale 6.

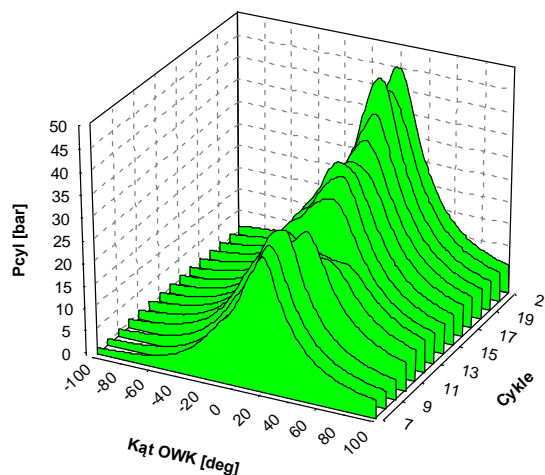
6. Analiza pracy silnika w warunkach przejściowych

Warunki przejściowe określono jako zmiany prędkości obrotowej i obciążenia (i wynikające z tego zmiany p_i) podczas gwałtownego przyspieszania. Przyspieszanie realizowano od około $n = 1230$ obr/min do około 3350 obr/min. Zmiany przebiegu ciśnienia w cylindrze, prędkości obrotowej silnika, średniego ciśnienia indykowanego oraz kąta wyprzedzenia zapłonu przedstawiono na rys. 11. Wynika z niego, że zmiana prędkości obrotowej w podanym wyżej zakresie wymagała 12 cykli (od 7. do 19. cyklu pracy silnika).

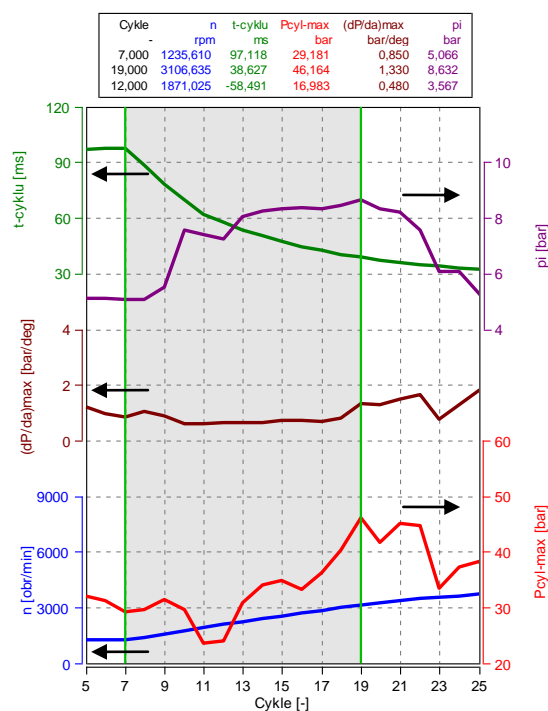


Rys. 11. Warunki pracy silnika podczas gwałtownego przyspieszania

Przebieg zmienności ciśnienia w cylindrze (rys. 12) w powiązaniu ze zmianą prędkości obrotowej w każdym cyklu pracy (rys. 13) prowadzi do uzyskania dużych przyrostów prędkości silnika na 1 cykl. Wadą badań indykatorowych na rzeczywistym wielocylindrowym silniku jest brak uwzględniania (w tym przypadku) cykli roboczych pozostałych cylindrów silnika spalinowego. Podczas przyspieszania czas cyklu ulega znacznemu skróceniu, co stanowi odwrotność prędkości obrotowej. Należy zauważyć gwałtowny przyrost p_i (w początkowych cyklach przyspieszania), co skutkuje jednocześnie dużymi maksymalnymi przyrostami ciśnienia w cylindrze. Szybkość przyrostu ciśnienia utrzymywana jednocześnie jest na stałym poziomie. Oznacza to, że wielkość ta nie jest dobrym wskaźnikiem do określenia warunków pracy w stanach nieustalonych.



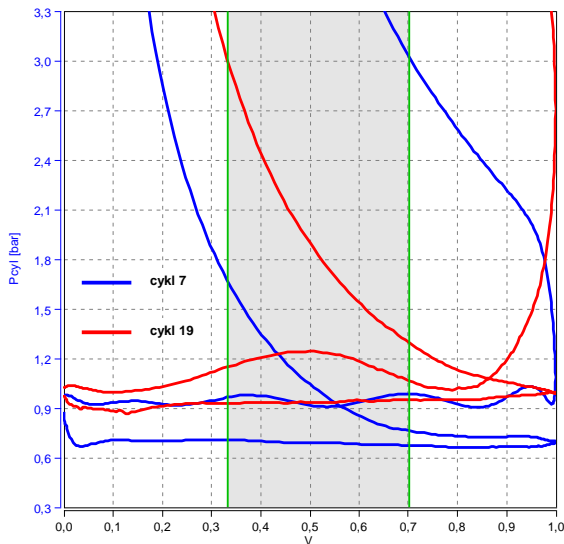
Rys. 12. Kolejne cykle pracy silnika do uzyskania maksymalnego ciśnienia indykowanego podczas przyspieszania



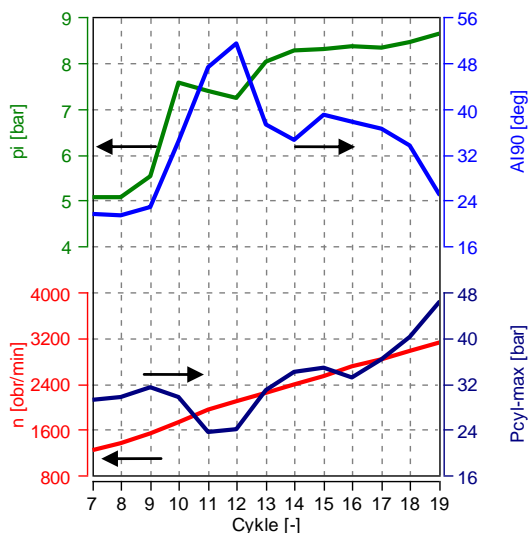
Rys. 13. Wskaźniki pracy silnika podczas przyspieszania

Na rysunku 14 przedstawiono analizę cyklu pracy obiegu Atkinsona przedstawiając pętlę wymiany ładunku na wykresie indykatorowym. Wynika z niej, iż w czasie przyspieszania następuje ciągła, płynna zmiana faz rozrządu co skutkuje podwyższaniem ciśnienia końca sprężania.

W czasie przyspieszania odnotowano wzrost średniego ciśnienia indykowanego. Wzrost tej wartości nie jest powiązany ściśle z wartościami maksymalnego ciśnienia w cylindrze (rys. 15, np.: cykle 11-12 i 15-16). Natomiast stwierdzono, że kąt wystąpienia AI90 zmniejsza się wraz z osiągnięciem maksymalnych wartości p_i i $P_{cyl-max}$ dla zarejestrowanych przebiegów.



Rys. 14. Porównanie ciśnienia zamknięcia dolotu dla cyklu 7. oraz 19. (kończącego analizę przyspieszenia)



Rys. 15. Zmiany wskaźników termodynamicznych silnika w kolejnych cyklach pracy podczas przyspieszania

Na tej podstawie wyznaczono wskaźniki pracy z cyklu-na-cykl (rys. 16). Nieustalone warunki pracy wykazują przyrost prędkości obrotowej z cyklu-na-cykl o 80 do 200 obr/min. Zmiana maksymalnego ciśnienia w cylindrze wynosi około 6 bar. Zmiana średniego ciśnienia indykowanego wynosi około 1,2 bar/cykl w początkowym okresie przyspieszania. Znaczne zmiany wykazuje również koniec wywiązywania ciepła (AI90), który w badaniach zmieniał się łącznie o około 20 stopni.

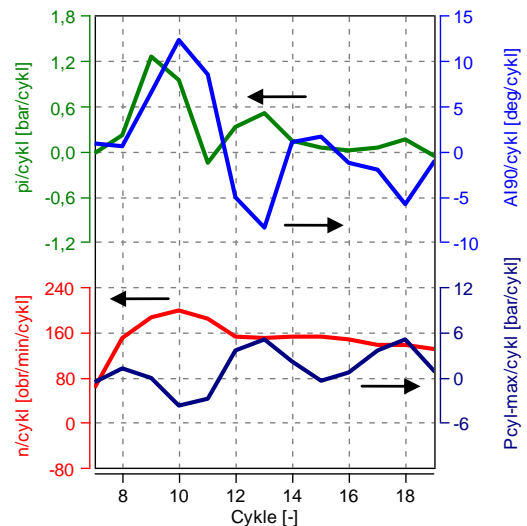
7. Podsumowanie

Przeprowadzone badania wskazują na istotność określania wskaźników operacyjnych pracy silnika w warunkach nieustalonych. Wskaźniki te w dużym

stopniu prawidłowo charakteryzują nieustalone warunki pracy silnika spalinowego.

Rozruch silnika charakteryzowany jest następującymi warunkami pracy:

a) cykle pracy silnika rozpoczynają się od „późnego” cyklu Atkinsona przechodząc stopniowo do cykli z wcześniejszym zamknięciem dolotu, co pozwala na uzyskanie powolnego narastania ciśnienia w cylindrze oraz średniego ciśnienia indykowanego.



Rys. 16. Zmiany wskaźników termodynamicznych silnika na cykl pracy w kolejnych obrotach wału korbowego podczas przyspieszania

b) rozruch silnika następuje po około 7-8 cyklach pracy silnika, co stanowi około 1,1 s. Długi czas stabilizacji prędkości po rozruchu jest możliwy dzięki wykorzystaniu silników elektrycznych do napędu pojazdu (uruchomienie silnika spalinowego następowało podczas ruchu pojazdu)..

Ustalone warunki pracy silnika z obiegiem Atkinsona wskazują na niewielkie wartości współczynnika zmienności (CoV) różnych wskaźników spalania; cykl Atkinsona jest przydatny w zastosowaniach, w których dąży się do uzyskania dużej sprawności cieplnej o ograniczonych stratach sprężania ładunku.

Zmienne warunki pracy silnika są charakteryzowane przez:

a) wskaźniki procesu termodynamicznego, takie jak zmiana P_{cyl-max}, p_i, AI90 oraz zmiana prędkości obrotowej silnika z cyklu-na-cykl,

b) zmiana ciśnienia indykowanego o wartości 1,2 bar/cykl wskazuje na dużą zmienność cykli pracy podczas przyspieszania silnika, co potwierdzają duże zmiany kąta 90% wywiązania ciepła; zmiana prędkości obrotowej wynosi ponad 200 obr/min/cykl, co przyczynia się do krótkiego czasu procesu przyspieszania.

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

AI10	angle of heat release (10%)/kąt wywiązania 10% ciepła	I	integrated of heat release rate/skumulowany przebieg szybkości wywiązania ciepła
AI50	angle of heat release (50%)/kąt wywiązania 50% ciepła	n	engine speed/prędkość obrotowa silnika
AI90	angle of heat release (90%)/kąt wywiązania 90 % ciepła	Pcyl	cylinder pressure/ciśnienie w cylindrze
a-Pcyl	angle of cylinder pressure/kąt występowania ciśnienia w cylindrze	p _i	indicating mean effective pressure/średnie ciśnienie indykowane
a-z	ignition advance/kąt wyprzedzenia zapłonu	SOC	start of combustion/początek spalania
CoV	Coefficient of Variation/współczynnik zmienności	t-cyklus	time of cycle duration/czas trwania cyklu
		t-rozruchu	time of engine start/czas rozruchu silnika

Bibliography/Literatura

- [1] Black J., Eastwood P.G., Tufail K., Winstanley T.: Diesel engine transient control and emissions response during a European Extra-Urban Drive Cycle. SAE Technical Paper 2007-01-1938, 2007.
- [2] Deng J., Zhang Y., Hu Z., Wu Z., Li L.: Effect of first cycle fuel injection timing on performance of a PFI engine during quick start for HEV application. SAE Technical Paper 2011-01-0886, 2011.
- [3] Gong Ch., Huang K., Chen Y., Jia J., Su Y., Liu X.: Cycle-by-cycle combustion variation in a DISI engine fueled with methanol. Fuel 90, 2817–2819, 2011.
- [4] Huang B., Hu E., Huang Z., Zheng J., Liu B., Jiang D.: Cycle-by-cycle variations in a spark ignition engine fueled with natural gas-hydrogen blends combined with EGR. International Journal of Hydrogenenergy 34:8405–8414, 2009.
- [5] Lejsek D., Kulzer A.: Investigations on the transient wall heat transfer at start-up for SI engines with gasoline direct injection. SAE Int. J. Engines 2 (1):381–397, SAE Technical Paper 2009-01-0613, 2009.
- [6] Li L., Li G., Liu Z., Li Z., Qiu D.: Characteristics of transient NO emissions based on the first firing cycle analysis of cold-start. SAE Technical Paper 2006-01-1050, 2006.
- [7] Nakayama S., Ibuki T., Hosaki H., Tominaga H.: An application of model based combustion control to transient cycle-by-cycle diesel combustion. SAE Int. J. Engines 1(1):850–860, SAE Technical Paper 2008-01-1311, 2008.
- [8] Sena A.K., Zheng J., Huang Z.: Dynamics of cycle-to-cycle variations in a natural gas direct-injection spark-ignition engine. Applied Energy 88:2324–2334, 2011.

Mr Ireneusz Pielecha, DSc., DEng. – Doctor in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology.

Dr hab. inż. Ireneusz Pielecha – adiunkt na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.



Mr Przemysław Borowski, MEng. – postgraduate in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology.

Mgr inż. Przemysław Borowski – doktorant na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.



Mr Jakub Czajka, DEng. – Doctor in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology.

Dr inż. Jakub Czajka – adiunkt na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.



Prof. Krzysztof Wisłocki, DSc., DEng. – Professor in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology.

Dr hab. inż. Krzysztof Wisłocki, prof. PP – profesor na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.

